下载APP

15 | Java JIT编译器（三）：探究内联和逃逸分析的算法原理

2020-07-06 宫文学

编译原理实战课 进入课程 >

讲述：宫文学
时长 20:09 大小 18.47M

你好，我是宫文学。

基于 Graal IR 进行的优化处理有很多。但有些优化，针对 Java 语言的特点，会显得更为重要。

今天这一讲，我就带你来认识两个对 Java 来说很重要的优化算法。如果没有这两个优化算法，你的程序执行效率会大大下降。而如果你了解了这两个算法的机理，则有可能写出更方便编译器做优化的程序，从而让你在实际工作中受益。这两个算法，分别是**内联和逃逸分析**。

另外，我还会给你介绍一种 JIT 编译所特有的优化模式：**基于推理的优化**。这种优化模式会让某些程序比 AOT 编译的性能更高。这个知识点，可能会改变你对 JIT 和 AOT 的认

知，因为通常来说，你可能会认为 AOT 生成的机器码速度更快，所以通过这一讲的学习，你也会对“全生命周期优化”的概念有所体会。

好，首先，我们来看看内联优化。

内联（Inlining）

内联优化是 Java JIT 编译器非常重要的一种优化策略。简单地说，内联就是把被调用的方法的方法体，在调用的地方展开。这样做最大的好处，就是省去了函数调用的开销。对于频繁调用的函数，内联优化能大大提高程序的性能。

执行内联优化是有一定条件的。第一，被内联的方法要是热点方法；第二，被内联的方法不能太大，否则编译后的目标代码量就会膨胀得比较厉害。

在 Java 程序里，你经常会发现很多短方法，特别是访问类成员变量的 getter 和 setter 方法。你可以看看自己写的程序，是否也充斥着很多对这种短方法的调用？这些调用如果不做优化的话，性能损失是很厉害的。你可以做一个性能对比测试，通过“`-XX:-Inlining`”参数来阻止 JVM 做内联优化，看看性能降低得会有多大。

但是这些方法有一个好处：它们往往都特别短，内联之后，实际上并不会显著增加目标代码长度。

比如，针对 add2 示例方法，我们采用内联选项优化后，方法调用被替换成了 LoadField（加载成员变量）。

复制代码

```
1 public int add2(){
2     return getX() + getY();
3 }
```

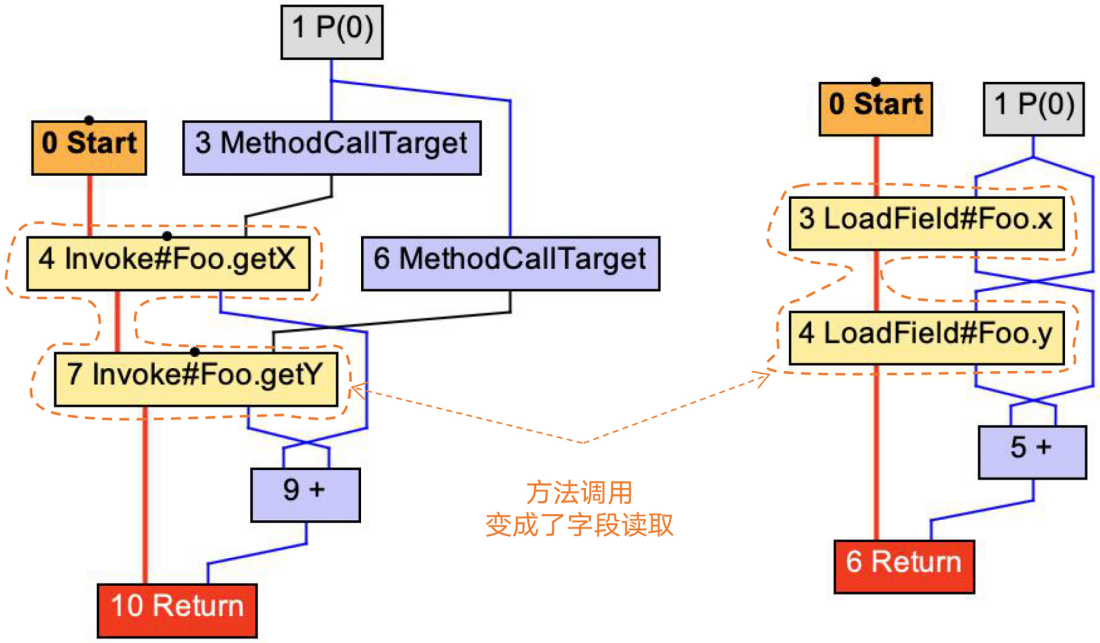


图 1：将 getter 方法内联

在做了 Lower 处理以后，LoadField 会被展开成更底层的操作：根据 x 和 y 的地址相对于对象地址的偏移量，获取 x 和 y 的值。

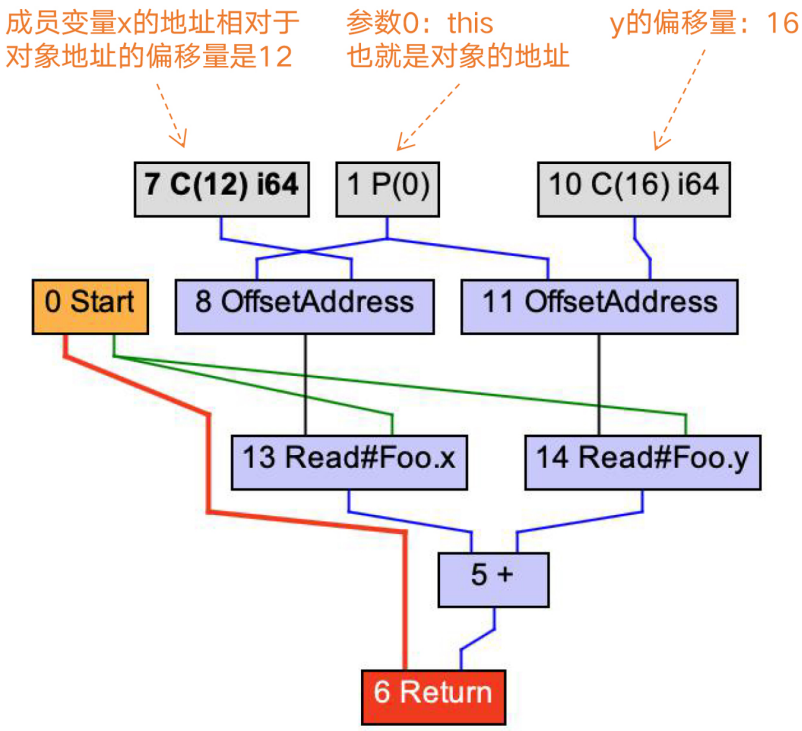


图 2：计算字段 x 和 y 的地址

而要想正确地计算字段的偏移量，我们还需要了解 Java 对象的**内存布局**。

在 64 位平台下，每个 Java 对象头部都有 8 字节的标记字，里面有对象 ID 的哈希值、与内存收集有关的标记位、与锁有关的标记位；标记字后面是一个指向类定义的指针，在 64 位平台下也是 8 位，不过如果堆不是很大，我们可以采用压缩指针，只占 4 个字节；在这后面才是 x 和 y 字段。因此，x 和 y 的偏移量分别是 12 和 16。

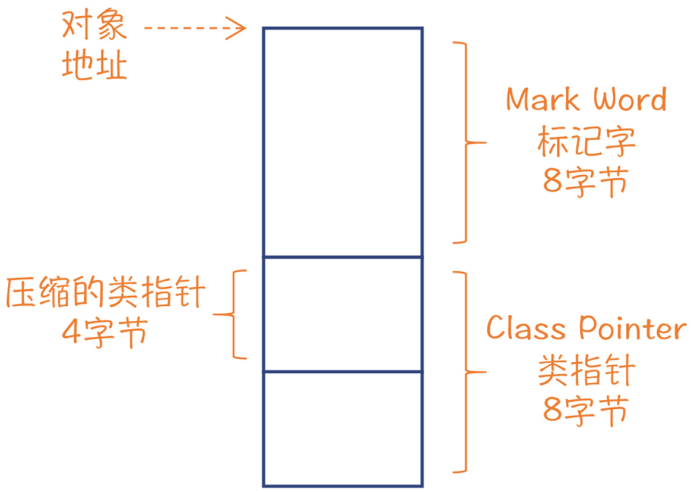


图 3：内存中，Java 对象头占据的空间

在 Low Tier 编译完毕以后，图 2 还会进一步被 Lower，形成 AMD64 架构下的地址。这样的话，编译器再进一步翻译成汇编代码就很容易了。

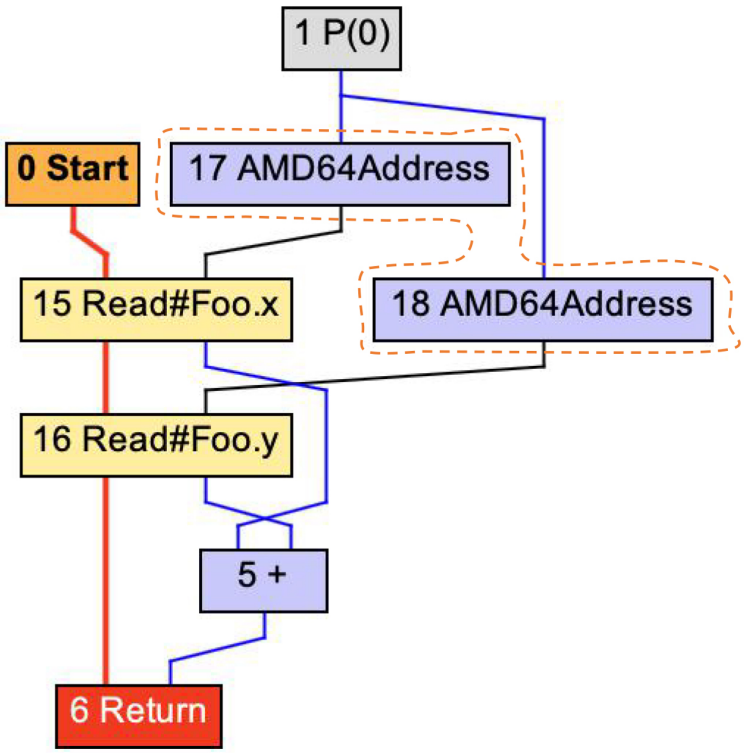


图 4：生成 AMD64 架构的地址计算节点

内联优化除了会优化 getter、setter 这样的短方法，它实际上还起到了另一个重要的作用，即**跨过程的优化**。一般的优化算法，只会局限在一个方法内部。而启动内联优化后，多个方法会合并成一个方法，所以就带来了更多的优化的可能性。

我们来看看下面这个 inlining 示例方法。它调用了一个 atLeastTen 方法，这个方法对于 <10 的参数，会返回 10；对于≥10 的参数，会返回该参数本身。所以你用肉眼就可以看出来，inlining 方法的返回值应该是 10。

复制代码

```
public int inliningTest(int a){
    return atLeastTen(3);    //应该返回10
}

//至少返回10
public int atLeastTen(int a){
    if (a < 10)
        return 10;
    else
        return a;
}
```

如果不启用编译器的内联选项，那么 inliningTest 方法对应的 IR 图，就是常规的方法调用而已：

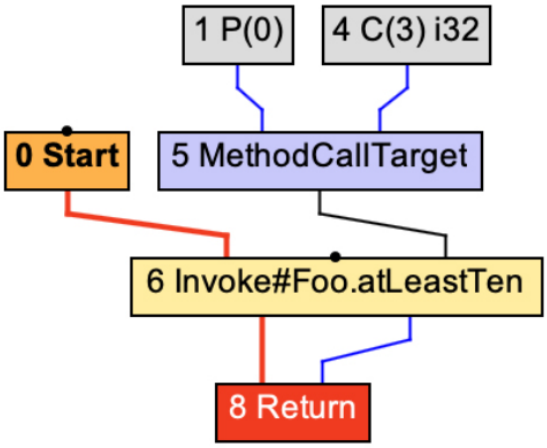


图 5：不启用内联时调用 atLeastTen() 方法

而一旦启用了内联选项，就可以触发一系列的优化。在把字节码解析生成 IR 的时候，编译器就启动了内联分析过程，从而会发现 this 参数和常量 3 对于 inliningTest 方法根本是无用的，在图里表现成了一些孤岛。在 Mid Tier 处理完毕之后，inliningTest 方法就直接返回常量 10 了。

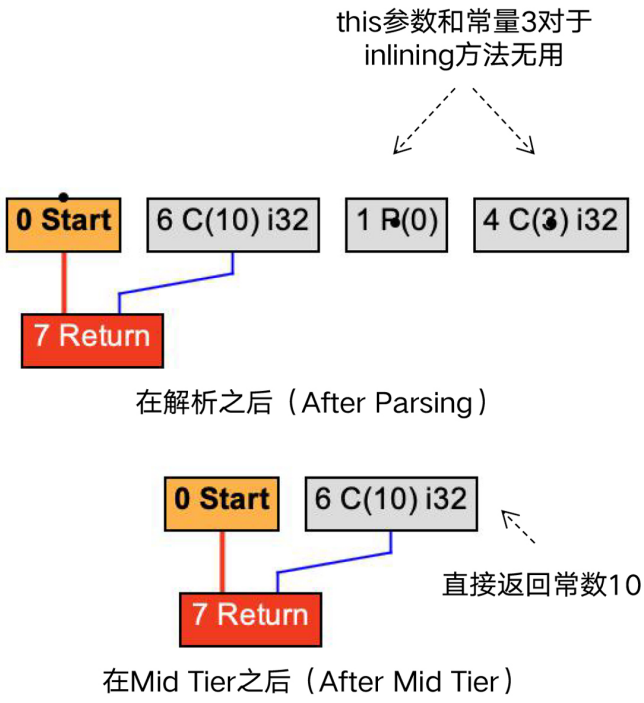


图 6：启用内联后，调用 atLeastTen() 方法

另外，方法的类型也会影响 inlining。如果方法是 final 的，或者是 private 的，那么它就不会被子类重载，所以可以大胆地内联。

但如果存在着多重继承的类体系，方法就有可能被重载，这就会导致**多态**。在运行时，JVM 会根据对象的类型来确定到底采用哪个子类的具体实现。这种运行时确定具体方法的过程，叫做**虚分派**（Virtual Dispatch）。

在存在多态的情况下，JIT 编译器做内联就会遇到困难了。因为它不知道把哪个版本的实现内联进来。不过编译器仍然没有放弃。这时候所采用的技术，就叫做“**多态内联**（Polymorphic inlining）”。

它的具体做法是，在运行时，编译器会统计在调用多态方法的时候，到底用了哪几个实现。然后针对这几个实现，同时实现几个分支的内联，并在一开头根据对象类型判断应该走哪个分支。**这个方法的缺陷是生成的代码量会比较大，但它毕竟可以获得内联的好处。**

最后，如果实际运行中遇到的对象，与提前生成的几个分支都不匹配，那么编译器还可以继续用缺省的虚分派模式来做函数调用，保证程序不出错。

这个案例也表明了，JIT 编译器是如何充分利用运行时收集的信息来做优化的。对于 AOT 模式的编译来说，由于无法收集到这些信息，因此反倒无法做这种优化。

如果你想对多态内联做更深入的研究，还可以参考这一篇经典论文《Inlining of Virtual Methods》。

总结起来，内联优化不仅能降低由于函数调用带来的开销，还能制造出新的优化机会，因此带来的优化效果非常显著。接下来，我们看看另一个能带来显著优化效果的算法：逃逸分析。

逃逸分析（Escape Analysis, EA）

逃逸分析是 JVM 的另一个重要的优化算法，它同样可以起到巨大的性能提升作用。

逃逸分析能够让编译器判断出，一个对象是否能够在创建它的方法或线程之外访问。如果只能在创建它的方法内部访问，我们就说这个对象不是方法逃逸的；如果仅仅逃逸出了方法，但对这个对象的访问肯定都是在同一个线程中，那么我们就说这个对象不是线程逃逸的。

判断是否逃逸有什么用呢？用处很大。只要我们判断出了该对象没有逃逸出方法或线程，就可以采用更加优化的方法来管理该对象。

以下面的示例代码为例。我们有一个 escapeTest() 方法，这个方法可以根据输入的年龄，返回年龄段：小于 20 岁的返回 1，否则返回 2。

在示例程序里，我们创建了一个 Person 对象，并调用它的 ageSegment 方法，来返回年龄段。

复制代码

```
1 public int escapeTest(int age){
2     Person p = new Person(age);
3     return p.ageSegment();
4 }
```

```
5  public class Person{
6      private int age;
7      private float weight;
8
9      public Person(int age){
10         this.age = age;
11     }
12
13     //返回年龄段
14     final public int ageSegment(){
15         if (age < 20)
16             return 1;
17         else
18             return 2;
19     }
20
21     public void setWeight(float weight){
22         this.weight = weight;
23     }
24
25     public float getWeidht(){
26         return weight;
27     }
28 }
29
```

你可以分析一下，针对这段程序，我们可以做哪些优化工作？

首先是**栈上分配内存**。

在 Java 语言里，对象的内存通常都是在堆中申请的。对象不再被访问以后，会由垃圾收集器回收。但对于这个例子来说，Person 对象的生命周期跟 escapeTest() 方法的生命周期是一样的。在退出方法后，就不再会有别的程序来访问该对象。

换句话说，这个对象跟一个 int 类型的本地变量没啥区别。那么也就意味着，我们其实可以在栈里给这个对象申请内存就行了。

你已经知道，在栈里申请内存会有很多好处：可以自动回收，不需要浪费 GC 的计算量去回收内存；可以避免由于大量生成小对象而造成的内存碎片；数据的局部性也更好，因为在堆上申请内存，它们的物理地址有可能是不相邻的，从而降低高速缓存的命中率；再有，在并发计算的场景下，在栈上分配内存的效率更高，因为栈是线程独享的，而在堆中申请内存可能需要多线程之间同步。所以，我们做这个优化是非常有价值的。

再进一步，还可以做**标量替换**（Scalar Replacement）。

这是什么意思呢？你会发现，示例程序仅仅用到了 Person 对象的 age 成员变量，而 weight 根本没有涉及。所以，我们在栈上申请内存的时候，根本没有必要为 weight 保留内存。同时，在一个 Java 对象的标准内存布局中，还要有一块固定的对象头的内存开销。在 64 位平台，对象头可能占据了 16 字节。这下倒好，示例程序本来只需要 4 个字节的一个整型，最后却要申请 24 个字节，是原需求的 6 倍，这也太浪费了。

通过标量替换的技术，我们可以根本不生成对象实例，而是把要用到的对象的成员变量，作为普通的本地变量（也就是标量）来管理。

这么做还有一个好处，就是编译器可以尽量把标量放到寄存器里去，连栈都不用，这样就避免了内存访问所带来的性能消耗。

Graal 编译器也确实是这么做的。在 Mid Tier 层处理完毕以后，你查看 IR 图，会发现它变成了下面的这个样子：

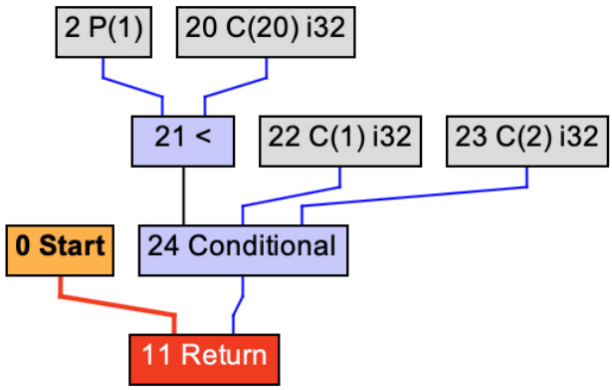


图 7：对 Person 对象做标量替换

你会看到，编译器连 Person 的 ageSegement 方法也内联进来了。最后优化后的函数相当于：

复制代码

```
public int escapeTest(int age){
  return age<20 ? 1 : 2;
}
```

图 7 中的 Conditional 是一个条件计算的三元表达式。你看到这个优化结果的时候，有没有感到震惊？是的。善用编译器的优化算法，就是会达到如此程度的优化。优化前后的代码的功能是一样的，但优化后的代码变得如此简洁、直奔最终计算目标，忽略中间我们自己编程所带来的冗余动作。

上面讲的都是没有逃逸出方法的情况。这种情况被叫做 **NoEscape**。还有一种情况，是虽然逃逸出了方法，但没有逃逸出当前线程，也就是说不可能被其他线程所访问，这种逃逸叫做 **ArgEscape**，也就是它仅仅是通过方法的参数逃逸的。最后一种情况就是 **GlobalEscape**，也就是能够被其他线程所访问，因此没有办法优化。

对于 ArgEscape 的情况，虽然编译器不能做内存的栈上分配，但也可以做一定的优化，这就是**锁消除或者同步消除**。

我们知道，在并发场景下，锁对性能的影响非常之大。而很多线程安全的对象，比如一些集合对象，它们的内部都采用了锁来做线程的同步。如果我们可以确定这些对象没有逃逸出线程，那么就可以把这些同步逻辑优化掉，从而提高代码的性能。

好了，现在你已经理解了逃逸分析的用途。那么逃逸分析的算法是怎么实现的呢？这方面你可以去参考这篇经典论文《Escape Analysis for Java》。论文里的算法利用了一种数据结构，叫做**连接图**（Connection Graph）。简单地说，就是分析出了程序中对象之间的引用关系。

整个分析算法是建立在这样一种直觉认知上的：**基于一个连接图，也就是对象之间的引用关系图，如果 A 引用了 B，而 A 能够被线程外的程序所访问（线程逃逸），那么也就意味着 B 也是线程逃逸的。**也就是说，**逃逸性是有传染能力的。**通过这样的分析，那些完全没被传染的对象，就是 NoEscape 的；只被 ArgEscape 对象传染的，那就也是 ArgEscape 的。原理说起来就是这么简单。

另外，我们前面所做的分析都是静态分析，也就是基于对代码所做的分析。对于一个对象来说，只要存在任何一个控制流，使得它逃逸了，那么编译器就会无情地把它标注为是逃逸对象，也就不能做优化了。但是，还会出现一种情况，就是有可能这个分支的执行频率特别少，大部分情况下该对象都是不逃逸的。

所以，Java 的 JIT 编译器实际上又向前迈进了一步，实现了**部分逃逸分析**（Partial Escape Analysis）。它会根据运行时的统计信息，对不同的控制流分支做不同的处理。对于没有逃逸的分支，仍然去做优化。在这里，你能体会到，编译器为了一点点的性能提升，简直无所不用其极呀。

如果你还想对部分逃逸分析做进一步的研究，那你可以参考这篇论文：《Partial Escape Analysis and Scalar Replacement for Java》。

总结起来，逃逸分析能够让对象在栈上申请内存，做标量替换，从而大大减少对象处理的开销。这个算法对于对象生命周期比较短的场景，优化效果是非常明显的。

在讲内联和逃逸算法的时候，我们都发现，编译器会根据运行时的统计信息，通过推断来做一些优化，比如多态内联、部分逃逸分析。而这种优化模式，就叫做基于推理的优化。

基于推理的优化（Speculative Optimization）

我刚刚说过，一般情况下，编译器的优化工作是基于对代码所做的分析，也就是静态分析。而 JIT 编译还有一个优势，就是会根据运行时收集的统计信息来做优化。

我还是以 Foo.atLeastTen() 方法举例。在正常情况下，它生成的 HIR 是下面的样子，根据条件表达式的值（a<10），分别返回 10 和 a。

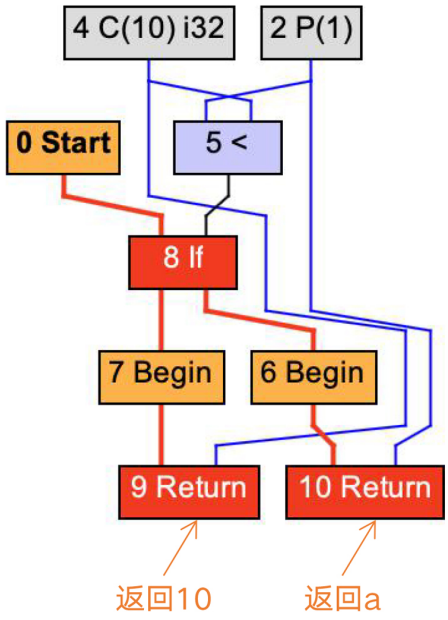


图 8：基于静态分析编译 atLeastTen() 方法

而如果我们在主程序里调用 atLeastTen 方法是采用下面示例代码中的逻辑，在启动 JIT 编译器时，已经循环了上万次。而在这上万次当中，只有 9 次 i 的值是小于 10 的，那么编译器就会根据运行时的统计信息判断，i 的值大概率是大于 10 的。所以，它会仅针对大于 10 的分支做编译。

而如果遇到小于 10 的情况，则会导致逆优化。你会看到，IR 中有一个绿色的 FrameState 节点，这个节点保存了栈帧的状态，在逆优化时会被用到。

复制代码

```
int i = 0;
while(true){
    i++;
    foo.atLeastTen(i);
    ...
}
```

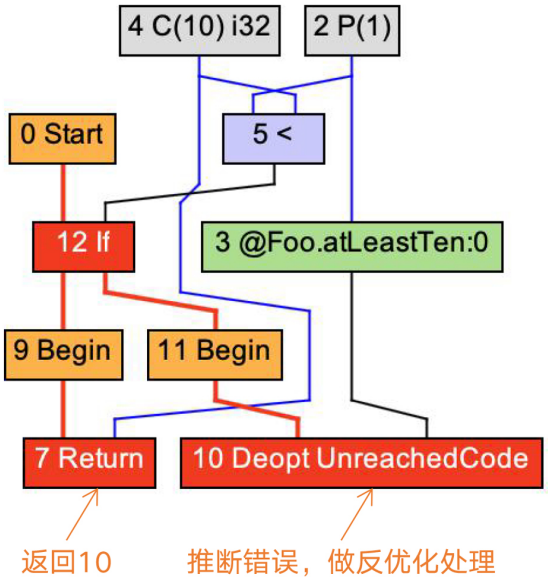


图 9：基于推理优化，只编译 if 语句的第 1 个分支，返回 10

我们把主程序修改一下，再做一次实验。这次，我们传给 Foo.atLeastTen 方法的参数是 i%10，也就是参数 a 的取值范围永远是在 0 到 9 之间。这一次，JIT 编译器会反过来，仅针对 a 小于 10 的分支做编译，而对 a 大于 10 的情况做逆优化处理。

复制代码

```
int i = 0;
while(true){
```

```
    i++;
    foo.atLeastTen(i%10);
    ...
```

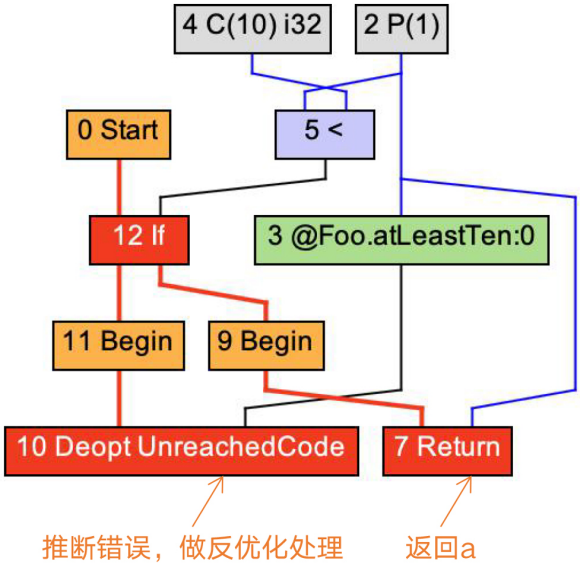


图 10：基于推理优化，只编译 if 语句的第 2 个分支，返回 a

通过这个简单的例子，你对 JIT 编译器基于推理的优化情况就有了一个直观的了解。对于 atLeastTen 这个简单的方法，这样的优化似乎并不会带来太多的好处。但对于比较复杂的程序，那既可以节省编译时间，也能减少编译后的代码大小，收益是很高的。比如对于程序中仅用于输出 Debug 信息的分支，就根本不需要生成代码。

另外，这种基于推理的优化，还会带来其他额外的优化机会。比如对于逃逸分析而言，去掉了一些导致逃逸的分支以后，在剩下的分支中，对象并没有逃逸，所以也就可以做优化了！

总结起来，基于运行时的统计信息进行推理的优化，有时会比基于静态分析的 AOT 产生出性能更高的目标代码。所以，现代编译技术的实践，会强调“全生命周期”优化的概念。甚至即使是 AOT 产生的目标代码，仍然可以在运行期通过 JIT 做进一步优化。LLVM 项目的发起人之一，Chris Lattner 就曾写了一篇论文来提倡这个理念，这也是 LLVM 的设计目标之一。

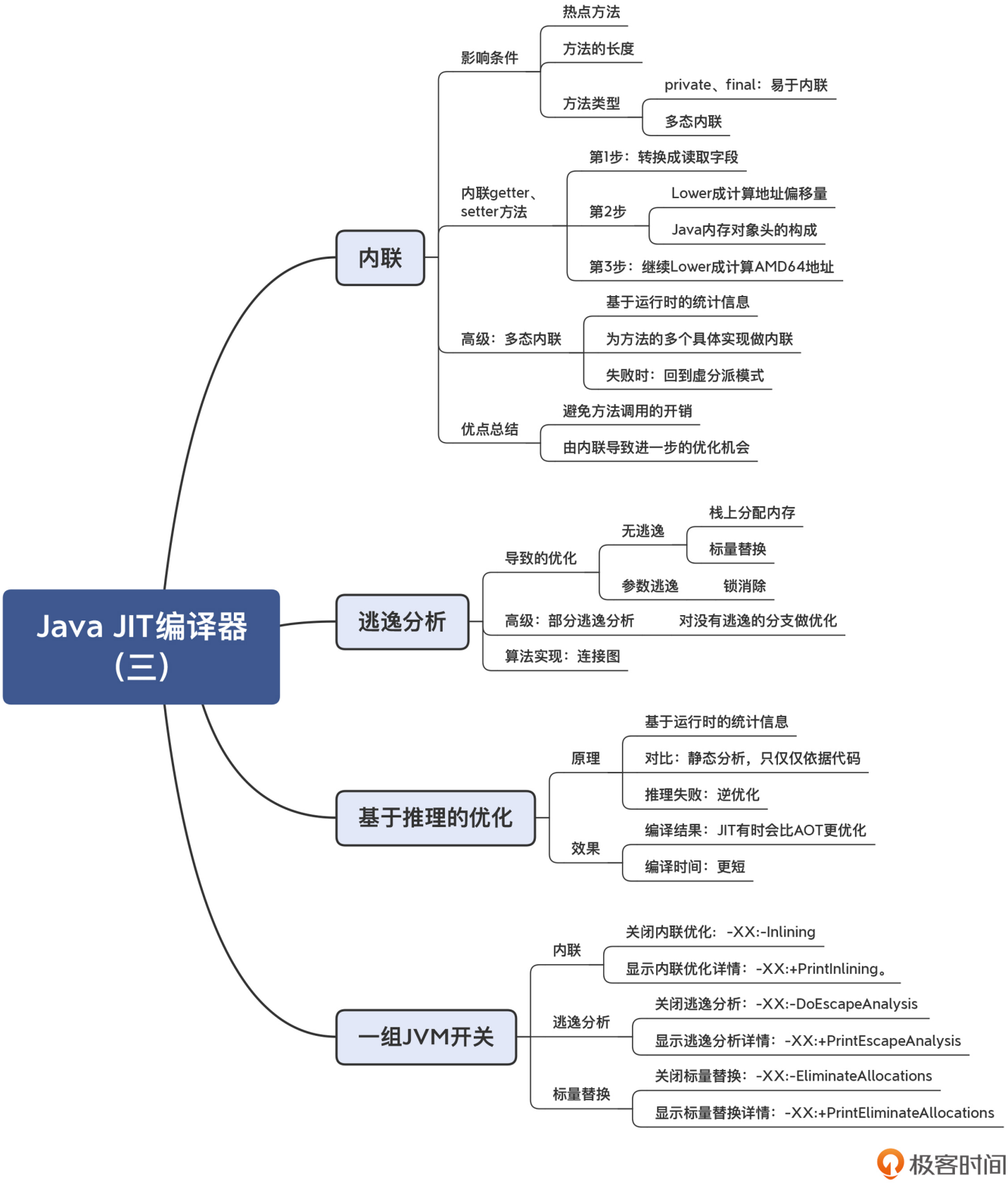
课程小结

今天我带你了解了 Java JIT 编译器中两个重要的优化算法，这两个优化算法都会大大提升程序的执行效率。另外，你还了解了在 JIT 编译中，基于运行时的信息做推理优化的技术。

在课程中，我不可能带你去分析所有的优化算法，但你可以根据课程的内容去举一反三，研究一下里面的其他算法。如果你对这些算法掌握得比较清晰，那你就可以胜任编译器的开发工作了。因为编译器开发的真正的工作量，都在中后端。

另外，熟悉这些重要的优化算法的原理，还有助于你写出性能更高的程序。比如说，你要让高频使用的代码易于内联；在使用对象的时候，让它的作用范围清晰一些，不要做无用的关联，尽量不要逃逸出方法和线程之外，等等。

本讲的思维导图我也放在下面了，供你参考。



一课一思

今天的思考题，还是想请你设计一个场景，测试内联 vs 无内联，或者做逃逸优化 vs 无逃逸优化的性能差异。借此，你也可以熟悉一下如何控制 JVM 的优化选项。欢迎在留言区分享你在测试中的发现。

> 关闭内联优化: -XX:-Inlining。JDK8 缺省是打开的。

> 显示内联优化详情：-XX:+PrintInlining。
> 关闭逃逸分析：-XX:-DoEscapeAnalysis。JDK8 缺省是打开的。
> 显示逃逸分析详情：-XX:+PrintEscapeAnalysis。
> 关闭标量替换：-XX:-EliminateAllocations。JDK8 缺省是打开的。
> 显示标量替换详情：-XX:+PrintEliminateAllocations。

参考资料

1. 多态内联：Inlining of Virtual Methods。
2. 逃逸分析：Escape Analysis for Java。
3. 部分逃逸分析：Partial Escape Analysis and Scalar Replacement for Java。

提建议

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 14 | Java JIT编译器（二）：Sea of Nodes为何如此强大？

下一篇 16 | Java JIT编译器（四）：Graal的后端是如何工作的？

精选留言 (3)

写留言

leaf
2020-07-08

请教老师图1图2中的黑线和绿线是什么意思

展开

作者回复: 黑线和绿线都跟内存读写有关。
与内存状态有关的操作所构成的流，有时还会叫做Effect流，效果流。这时候会产生前后序的依赖关系。

易昊
2020-07-07

“它的具体做法是，在运行时，编译器会统计在调用多态方法的时候，到底用了哪几个实现。”这个是否有一定程度限制条件，比如我的程序运行在别人的虚拟机上，应该就统计不到了吧？

作者回复: 这句话我再解释一下。
比如，A有10个子类，B1、B2、B3...B10
但在实际运行时，很多子类可能从来没有用到过，只有B2和B3会被用到。那么，编译器只需要为这两个子类做优化就行了。这就是JIT的优势。它是根据实际运行的情况来优化的。

😐饲养员小张😐
2020-07-07

老师，能讲讲不同语言混编的时候，编译器到底会怎么做么？最近在做swift和objc的混编的事情，有点没搞明白，如果主工程是objc引入swift文件，和主工程是swift引入objc文件有什么区别么？还有两种语言是怎么做到识别对方的呢？像编辑器的代码补全和报错都是怎么识别的呢？毕竟这时候还没有真正的编译啊！感谢老师

展开

作者回复: 现代的IDE，是内置了编译功能的，这是IDE能那么智能的原因。一般只需要实现前端功能就行了，能够检查语法和语义的错误。
比如，如果你需要让Visual Studio Code支持某种语言，你需要提供一个支持语言服务器协议（LSP）的后台服务，让编辑器调用它的功能来支持解析、即时提示等功能。